



Robotique : de l'automate à l'humanoïde par Bernard Espiau. Un robot très curieux, entretien avec Pierre-Yves Oudeyer, propos recueillis par Dominique Chouchan.

Bernard Espiau, Pierre-Yves Oudeyer

► **To cite this version:**

Bernard Espiau, Pierre-Yves Oudeyer. Robotique : de l'automate à l'humanoïde par Bernard Espiau. Un robot très curieux, entretien avec Pierre-Yves Oudeyer, propos recueillis par Dominique Chouchan.. Les Cahiers de l'INRIA - La Recherche, 2008, Si le boson de Higgs n'existait pas, 424 novembre 2008. inria-00536681

HAL Id: inria-00536681

<https://inria.hal.science/inria-00536681>

Submitted on 16 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ROBOTIQUE

De l'automate à l'humanoïde

En dépit des apparences, tout sépare « le joueur de flûte »* de Vaucanson des futurs robots humanoïdes. À l'opposé des automates, ces derniers sauront s'adapter et adapter leurs décisions et actions à notre environnement.

Les technologies progressent parfois plus vite que les théories permettant d'en exploiter toutes les potentialités. Il en est ainsi de la robotique humanoïde, comme en témoignent certaines avancées japonaises. Des démonstrations spectaculaires de robots danseurs ou musiciens y révèlent une parfaite maîtrise des technologies et de leur intégration. Ces robots ne font toutefois que reproduire des gestes humains auparavant enregistrés en trois dimensions, ou bien sont programmés pour des tâches déterministes. La complexité de notre monde reste à ce jour l'obstacle majeur à leur autonomie. L'enjeu des recherches actuelles est donc de concevoir des méthodes leur permettant de se mouvoir, de prendre des décisions et d'interagir habilement avec leur environnement, naturel et humain.

Un grand nombre de robots ont pour mission d'exécuter des tâches trop complexes ou dangereuses pour l'humain seul. Le robot humanoïde ne fait pas exception mais avec une ambition beaucoup plus vaste : créature totalement artificielle, il devra néanmoins, comme un humain, se déplacer, anticiper et prendre des décisions dans des circonstances souvent imprévisibles (fig. 1). Pour atteindre ce but, il faut s'appuyer sur des représentations formelles de ses relations avec le monde, c'est-à-dire sur un ensemble de modèles. Plus leur formalisme sera riche, meilleures seront les possibi-

lités de simuler, planifier et contrôler ses mouvements et actions.

Premier défi : la locomotion⁽¹⁾. Le robot est un système mécanique muni d'actionneurs. Il s'agit donc de calculer les commandes qui permettront d'engendrer une marche réaliste, de supporter les variations de terrain et, surtout, de prévenir les chutes. Les équations dynamiques du modèle associé sont en général celles d'un système rigide articulé, obtenues à partir des équations de Lagrange*. Mais à la différence des robots à base fixe, l'espace de configuration* des humanoïdes comporte deux parties. L'une, classique, regroupe les coordonnées articulaires, en général commandées par des moteurs. Elles définissent la posture du robot hors toute influence extérieure (pesanteur...). L'autre partie regroupe ses coordonnées par rapport à un repère de référence de son environnement. Comment représenter son déplacement dans ce repère ?

Pour l'essentiel, il est produit par les forces de réaction avec le sol. Il s'agit donc de modéliser les contacts des pieds avec le sol, sachant que les seuls mouvements possibles sont dirigés vers le haut (on ne peut pénétrer dans un sol rigide). Il faut en outre modéliser les frottements pour éventuellement imposer des contraintes de non glissement : pas question de

Fig. 1 : Ce robot nommé Nao, autonome et entièrement programmable, se relève après une chute, comprend les ordres vocaux, lit les contenus sur Internet... Il a été sélectionné comme plateforme officielle de la plus grande compétition de robotique internationale, la RobotCup (football).

Conçu par la start up française Aldebaran créée en 2005, il est déjà commercialisé à des fins de recherche auprès de divers laboratoires et universités.



© ALDEBARAN ROBOTICS

* Inventeur de génie né à Grenoble, **Jacques de Vaucanson** (1709-1782) réalisa son premier automate flûtiste (flûte traversière) en 1738.

* Les **équations de Lagrange** relient les mouvements d'un système mécanique aux efforts extérieurs qui lui sont appliqués à partir des expressions de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.

* L'**espace de configuration** d'un système est l'ensemble des coordonnées généralisées paramétrant ses degrés de liberté, c'est-à-dire permettant de décrire sa forme, sa position, etc.

* Le **consortium SICONOS**, qui associe plusieurs dizaines de chercheurs de treize pays européens sur les questions de modélisation de systèmes non réguliers, est coordonné par l'INRIA.

* Les **générateurs centraux de patrons** (*Central Pattern Generators*) sont des circuits neuronaux localisés au niveau spinal qui produisent des activités rythmiques sans entrée périodique.

* Le **moment dynamique**, relié aux accélérations en rotation résultant de l'application d'actions extérieures à un système, représente la tendance au pivotement.

* Le **premier robot anthropomorphe européen**, BIP, est le fruit d'une collaboration entre l'INRIA (Grenoble) et le laboratoire de mécanique des solides (Poitiers) à la fin des années 1990.

* **LIRMM**, cette équipe associe notamment des scientifiques du CNRS, de l'université Montpellier II et de l'INRIA.

* Le **JRL**, ou *Joint Robotics Laboratory*, est le laboratoire franco-japonais de robotique humanoïde associant le CNRS, pour la France, et le *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology* (AIST), pour le Japon.



Fig. 2 : Cette image de robot marcheur, HRP-2 (conçu et réalisé par l'AIST et Kawada Industries) est le fruit d'une simulation réalisée grâce à la boîte à outils logiciels (*Humanoid Motion Analysis and Simulation* (HuManS) mise au point par l'équipe BIPOP de l'INRIA Grenoble. Utilisé par plusieurs équipes dans le monde, HuManS permet de modéliser, contrôler et analyser le mouvement d'un humanoïde.

laisser le robot déraier. Tous ces modèles sont fortement non linéaires. La marche se traduit en effet par une succession de ruptures : posé à terre, le pied subit une force de réaction mais ne bouge pas, et lorsqu'il bouge (pied soulevé), cette force n'intervient plus. C'est un cas particulier de système dit non régulier. Dans le cadre du consortium SICONOS*, une équipe du centre INRIA Grenoble-Rhône-Alpes a développé des techniques d'optimisation et les logiciels associés permettant de résoudre de tels systèmes. Ils sont notamment utilisés dans l'environnement de simulation HuManS (fig. 2).

À partir de là se pose le problème de la commande qui engendrera un mouvement alternatif réaliste des jambes. Ce n'est pas en soi le plus difficile. On s'inspire des générateurs centraux de patrons* (*Central Pattern Generators*) des organismes vivants : des trajectoires articulaires périodiques peuvent être produites à l'aide de réseaux de neurones dédiés (dits oscillants) ou d'équations différentielles non linéaires, ou encore d'équations polynomiales. En revanche, stabiliser le robot en temps réel pour qu'il ne soit pas à la merci du moindre choc est une autre affaire. Il s'agit de contrôler l'accélération du centre de masse (centre d'inertie), par exemple à l'aide d'un modèle simple de pendule inversé, ainsi que le moment dynamique* de l'ensemble. Dans le cas d'un sol horizontal plan, l'objectif consiste schématiquement à maintenir le centre de pivotement dynamique dans le polygone de sustentation.

Ainsi conçu, un robot est-il en mesure de marcher ? De nombreuses équipes dans le monde*

ont réalisé des prototypes qui marchent dans des conditions bien contrôlées⁽²⁾ (fig. 3). Mais comment éviter qu'un robot marcheur « se prenne les pieds dans le tapis » ? Désormais, les travaux s'orientent vers une conception conjointe de la commande et de la planification : l'idée est de lui donner les moyens d'anticiper les obstacles, donc de prévoir son déplacement, avant de mettre un pied devant l'autre, comme nous le faisons de manière instinctive. Parallèlement, ces recherches permettent de mieux comprendre la marche humaine, mais aussi de concevoir des dispositifs de restauration fonctionnelle. Cette dernière application illustre d'ailleurs une autre idée sous-jacente à toute représentation formelle : le choix d'un modèle pour une fonction donnée dépend de son contexte d'utilisation. L'équipe Déambulation et mouvement artificiel (DEMAR) du laboratoire d'informatique, de robotique et de micro-électronique de Montpellier (LIRMM)* travaille par exemple sur le passage à la position debout d'un paraplégique et sur la synthèse d'un déplacement avec déambulateur⁽³⁾.

Les modèles dynamiques requis ne sont pas aussi complexes que précédemment : on ne vise pas le processus de marche dans son intégralité. La complexité se situe au niveau de la modélisation du système d'actionnement complet, c'est-à-dire du système électronique de stimulation, depuis les électrodes jusqu'aux muscles. La modélisation implique en effet plusieurs échelles et des équations de nature différente (chimique, électronique, mécanique...). De plus, les effets temporels, comme la fatigue, doivent être pris en compte. Enfin, l'ajustement du modèle doit se faire au cas par cas.

Quant à l'humanoïde, il ne saurait se réduire à une paire de jambes ! Comment faire en sorte qu'il puisse à la fois se déplacer et agir ? Cela impose notamment de travailler sur le corps complet : bras, mains, jambes, systèmes de perception... Exemple : on veut qu'il saisisse une balle au vol tout en marchant. C'est ce défi qu'a relevé l'équipe LAGADIC, du centre INRIA Rennes-Bretagne Atlantique, et qui a donné lieu à une expérimentation au Joint Robotics Laboratory* (JRL). Le robot est équipé d'un système de stéréovision pour localiser la cible (deux caméras situées dans la tête). Ce système sert

aussi à construire une tâche visant à maintenir la position de la balle au centre de l'image vue par le robot.

La tâche de saisie de la balle s'appuie sur la mesure visuelle de sa localisation tridimensionnelle (3D) relativement au robot, le déplacement de celui-ci étant planifié et contrôlé suivant les principes évoqués plus haut. Le modèle utilisé permet de combiner ces diverses tâches en gérant leur priorité et en prenant en compte des contraintes, comme les limitations d'amplitude de déploiement des articulations. Cet exemple illustre de manière paradigmatique la question de la synchronisation entre déplacement, mouvement des bras et vision. Mais pour les roboticiens, il n'est pas encore que d'actions dites réflexes : une commande reliée à un capteur (perception).

L'autonomie décisionnelle d'un humanoïde fera en revanche appel à des actions réfléchies. En plus du modèle du robot et des contraintes associées, il faut donc s'appuyer sur un modèle de son environnement, au minimum une représentation géométrique et topologique, et sur des modèles perceptifs. Pour la prise de décision, un modèle de raisonnement peut alors être appliqué en utilisant des techniques d'optimisation combinatoire (recherche de la meilleure solution parmi un nombre fini de solutions) ou de programmation dynamique. C'est l'objet de recherches menées notamment au laboratoire d'architecture et d'analyse des systèmes (LAAS-CNRS, Toulouse).

Dernier niveau, le moins avancé, celui du cognitif : l'objectif est de conférer une forme d'intelligence au robot, y compris pour dialoguer avec l'humain. Les travaux sur la compréhension et la synthèse de la langue naturelle sont réutilisables. Mais on imagine aussi d'autres types d'interfaces (expression corporelle, émotions...). Les modèles de comportement doivent alors prendre en compte la

psychologie cognitive. Plus futuriste encore, l'autonomie totale en environnement complexe, par exemple pour des robots destinés à intervenir seuls après un tremblement de terre ou à assurer l'assistance à domicile de personnes âgées. À cet égard, les modes de représentation des connaissances comme les méthodes de construction de modèles de raisonnement et d'interaction dépassent le cadre strict de la robotique humanoïde (voir l'entretien avec P.-Y. Oudeyer).

Notons enfin que ce rêve de créer un humain artificiel⁽⁴⁾ agerme dans l'esprit du monde anti-

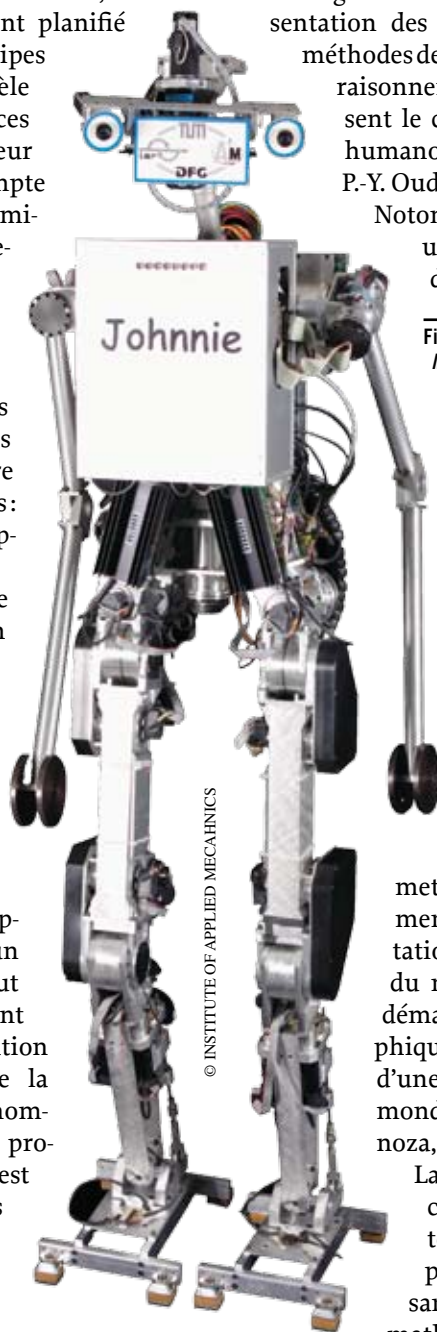


Fig. 3 : Réalisé à l'*Institute of Applied Mechanics* (université technique de Munich), le robot bipède Johnnie est pour l'instant capable d'avancer à une vitesse de 2,2 km/h. Il peut notamment emprunter des virages, marcher sur terrain plat ou accidenté et, grâce à son système de vision, choisir d'enjamber les obstacles ou de les contourner.

que bien avant d'être celui des scientifiques contemporains. Il va de soi que ces derniers se démarquent totalement des mythes transmis de génération en génération par les outils qu'ils mettent en œuvre, essentiellement fondés sur une représentation formelle et rationnelle du monde. De même qu'ils se démarquent des œuvres philosophiques traversées par cette quête d'une représentation formelle du monde (il n'est que de citer Spinoza, Leibniz, Wittgenstein...).

La créature artificielle qu'ils conçoivent dans leur laboratoire devra pour une grande part son existence à la puissance de l'algorithmique et des mathématiques comme outils de représentation du réel.

Bernard Espiau est aujourd'hui directeur scientifique adjoint de l'INRIA. Auparavant, il a entre autres été responsable du projet de robot bipède BIP au sein de l'INRIA Grenoble-Rhône-Alpes, avant de diriger ce centre (2001-2007), et après avoir dirigé l'Institut supérieur d'automatique et d'informatique (Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis).

⁽¹⁾ S. Kajita et B. Espiau, *Legged Robots*, et Ch. C. Kemp et al., *Humanoids*, in *Handbook of Robotics* (B. Siciliano et O. Khatib ed.), Springer, 2008.

⁽²⁾ Voir par exemple : <http://www.androidworld.com/>

⁽³⁾ Voir le site : http://interstices.info/jcms/c_19186/restaurer-la-marche-grace-a-une-puce

⁽⁴⁾ D. Ichbiah, *Les robots, genèse d'un peuple artificiel*, éditions Minerva, 2005.



© D.R.

Des robots commencent à « mimer » des comportements que l'on croyait réservés à l'humain.

Les robots peuvent-ils apprendre ?

Pierre-Yves Oudeyer : A partir d'exemples que nous lui donnons, cela peut être les positions d'un bras et les positions correspondantes de la main sur une image captée par sa caméra, un robot est capable de construire des modèles internes puis de les réutiliser pour anticiper

loppement, nous tentons de formaliser et d'implémenter* des systèmes de curiosité*. L'un des modèles les plus féconds repose sur la notion de « progrès en apprentissage ». Dans ce modèle, un premier niveau s'appuie sur un algorithme (par exemple un réseau de neurones artificiels) qui permet d'apprendre à prédire les conséquences de certaines actions. Un second niveau mesure l'évolution de ces capacités prédictives dans différents contextes sensorimoteurs, avec attribution à chaque fois d'une valeur d'intérêt (proportionnelle à la diminution des erreurs de prédiction). Enfin, un troisième niveau sélectionne les actions conduisant le robot dans les contextes aux plus fortes valeurs d'intérêt. Avec ce modèle, le robot essaie d'abord plusieurs activités au hasard. Puis il repère celles pour lesquelles ses prédictions s'améliorent le plus vite et se focalise dessus. Quand il les a maîtrisées, il en explore d'autres.

Avez-vous pu mettre vos concepts à l'épreuve ?

P.-Y. O. : Chez Sony, nous avons placé un robot quadrupède dans un environnement d'objets divers. Au départ, le robot ne connaissait rien du monde ni de lui-même hormis la liste de ses capteurs et moteurs (sans savoir quel capteur

Pierre-Yves Oudeyer, ici en compagnie d'un robot quadrupède (Sony), est chargé de recherche INRIA et responsable de l'équipe FLOWERS, en robotique développementale et sociale. Il s'intéresse à la modélisation des mécanismes qui permettent aux bébés de découvrir progressivement leur corps et leur environnement physique et social. D.R.

Entretien avec Pierre-Yves Oudeyer Un robot très curieux

des situations un peu différentes. Toutefois, les techniques d'apprentissage reposent sur une aide substantielle de leur concepteur : celui-ci utilise ses connaissances pour fournir au robot les bonnes mesures, les bons exemples et les bons paramètres à optimiser. Un énorme travail qu'il faut recommencer pour chaque tâche : apprendre à marcher est différent d'apprendre à saisir des objets... Je me suis donc intéressé aux mécanismes d'apprentissage des enfants, qui apprennent une grande diversité de savoir-faire... et sans l'aide d'un ingénieur. Parmi eux, les psychologues ont identifié des motivations dites intrinsèques qui poussent les enfants vers certaines activités parce que nouvelles et surprenantes, ou parce qu'ils parviennent à y exercer un contrôle. Ces motivations interviennent dans ce qu'on appelle communément la curiosité. D'où notre idée : rendre le robot curieux.

La curiosité serait-elle donc « modélisable » ?

P.-Y. O. : C'est là que se situe mon travail. À partir des théories des psychologues du déve-

correspondait à quoi : toucher, vision...). Doté d'un « système de curiosité », il s'est peu à peu mis à organiser ses actions (coups de patte, de tête...) vers des objets précis et même à interagir avec un autre robot en « découvrant » que ce dernier ne réagissait qu'à la voix.

Vos travaux ont-ils un impact en retour sur le travail des psychologues ?

P.-Y. O. : Lorsque nous implémentons certaines de leurs hypothèses, celles-ci sont confrontées à la réalité. Exemple : en construisant un robot uniquement motivé par la nouveauté, comme proposé par diverses théories, nous avons constaté qu'il passait son temps à regarder les feuilles d'un arbre tombant une à une, « fasciné » par leur imprédictibilité. Cela lui ôtait toute disponibilité pour un apprentissage : il fallait un mécanisme supplémentaire (désir de progresser). Cette théorie, proposée par des psychologues, a donc vu sa pertinence confirmée par nos expériences.

Propos recueillis par Dominique Chouchan

* Le verbe **implémenter**, entré officiellement dans la langue française en avril 2007, désigne la mise en œuvre des procédures (programmation...) permettant à l'ordinateur d'effectuer les opérations demandées (modèles, fonctions...)

* voir le site : <http://flowers.inria.fr>